

Окончание. Начало в № 9'2005.

Сергей НИКИФОРОВ
nikiforov@screens.ru

Температура в жизни и работе светодиодов

Часть 2

Температурные зависимости параметров светодиодов

Колориметрические характеристики

Зависимости колориметрических характеристик светодиодов от изменения температуры получены методом измерения спектрального состава их излучения с помощью установки, приведенной на рис. 3 (см. «КиТ» № 9'2005, с. 50). Являясь информативной и показательной частью многомерной системы параметров светодиодов, эти зависимости важны как с практической точки зрения их использования в устройствах, так и с точки зрения определения качественных показателей излучающих структур или примененных в них или иных светодиодах кристаллов. Наибольшее влияние на уход этих параметров при изменении температуры будет оказывать процесс, протекающий в области пространственного заряда и описанный формулой (1).

Однако существует также утверждение о том, что излучающую структуру стоит рассматривать не как единую область с флуктуацией ширины запрещенной зоны E_g , а как схему, где выполнено параллельное включение множества микроскопических p - n -переходов со своими, отличающимися друг от друга значениями $E_{g1}, E_{g2}, \dots, E_{gn}$. Набор таких p - n -переходов и формирует все спектральное распределение кристалла, внося свой вклад в виде отдельной длины волны (моды) и соответствующей амплитуды излучения. Подобная модель излучающей структуры хорошо объясняет изменение параметров спектра с температурой, когда изменения ширины запрещенной зоны каждого элемента приводят к пропорциональному изменению интенсивности излучения на своей длине волны. Точно такое же объяснение применимо и для изменения приложенного внешнего электрического поля (прямого напряжения), которое, кстати, будет меняться обязательно, в соответствии с зависимостями, показанными на рис. 4–8 (см. «КиТ» №9'2005, с. 50–51). При повышении U_f будут включаться малые p - n -переходы с наибольшими E_g , что увеличит вклад коротковолновых составляющих в спектр. При этом рост амплитуды длинноволновых компонентов, уже включенных в работу малыми U_f на экспоненциальном участке вольт-амперной характеристики, будет значительно меньшим из-за явления на-

сыщения и ограниченного их количества. При определенном U_f первый процесс будет доминировать над вторым. Этим объясняется характерная несимметрия спектрального распределения излучения, определяющаяся положением центроидной длины волны спектра при малых плотностях тока, выравнивающаяся при их увеличении или при изменении температуры.

В первом приближении количественный состав переходов с различными значениями E_g будет определяться гауссовским распределением относительно средних значений E_g для данной структуры, что и можно заметить при рассмотрении вида формы кривых спектрального распределения как результата сложения двух функций: упомянутой выше и функции распределения плотности заполнения Ферми–Дирака. Таким же образом состав спектра излучения позволяет судить о равномерности распределения легирующей примеси в слоях полупроводникового материала и наличии посторонних включений, что, по сути, и определяет качество излучающего кристалла и долговечность светодиода.

Сохраняя обозначенное ранее в первом пункте условное деление структур по цвету и составу (InGaN/AlGaIn/GaN — синие и зеленые, AlInGaP/GaP — красные и желтые), рассмотрим приведенные на рис. 17–21 зависимости колориметрических параметров от температуры. Диаграммы справедливы для плотностей тока через кристалл 20–50 А/см² (прямой ток через светодиод со стандартным кристаллом 300×300 мкм составляет 15–40 мА). Зависимости при других плотностях тока будут отличаться от приведенных из-за соответствующего изменения теплового действия тока.

Из рис. 17 хорошо видно, как изменяется и смещается спектр излучения при изменении температуры. Можно заметить, что все изменения происходят в заданном соответствии с описанными теоретическими предположениями. Однако приведенные здесь функции распределения светового потока по абсолютной длине волны $F(\lambda)$, как правило, не применяются для описания характеристик излучения светодиодов напрямую, а служат в основном исходным материалом для расчетов большого числа производных величин. Прежде всего, это связано с переходом абсолютных энергетических единиц к светотех-

ническим, зависящим от кривой видности глаза $V(\lambda)$ и образующимся путем нахождения интегрированной доли исследуемого спектра в общем интеграле функции $V(\lambda)$. Приведенные ниже графики зависимостей некоторых величин от температуры расположены в порядке возрастания информативности для визуальной оценки излучения светодиодов.

Для некоторого пояснения стоит рассмотреть рис. 18 с детализацией спектра излучения синего светодиода. Максимальная длина волны L_{max} показывает максимальную амплитудную составляющую спектра, по которой можно определить положение пика функции спектрального распределения на шкале длин волн. Длина волны L_{cen} (центроидная или центральная) более информативна и, являясь «центром масс» интеграла функции $F(\lambda)$, может дать понятие о симметрии кривой спектрального распределения в соответствии с тем, насколько она отличается от L_{max} . Это отличие обозначит фактор неидеальности спектрального распределения как следствие нарушения гауссовского распределения переходов с различными значениями E_g . В идеальном случае L_{max} и L_{cen} совпадут.

Наиболее часто в спецификациях встречается полуширина спектра излучения по уровню 0,5 от максимума амплитуды. Эта величина получается как разница значений длин волн правого и левого спадов спектральной характеристики излучения, соответствующих указанному выше уровню амплитуды. Полуширина функции $F(\lambda)$ позволяет судить о составе спектра излучения и степени монохроматичности (чистоты) цвета как качественного показателя излучения светодиода. На графике рис. 18 наглядно видно положение описанных величин, рассчитанных заранее из приведенного там спектра, понимание смысла которых позволит нам дальше подробно рассмотреть их зависимости от температуры и представить, как это выглядит в зрительном восприятии излучения светодиодов глазом человека.

Особо стоит отметить относительную спектральную световую эффективность излучения (оптический коэффициент, измеряемый в лм/Вт). Этот параметр тоже интегральный, и именно он осуществляет связь абсолютных энергетических характеристик излучения с функцией $V(\lambda)$, когда речь идет о световом потоке и мощности светового излучения.

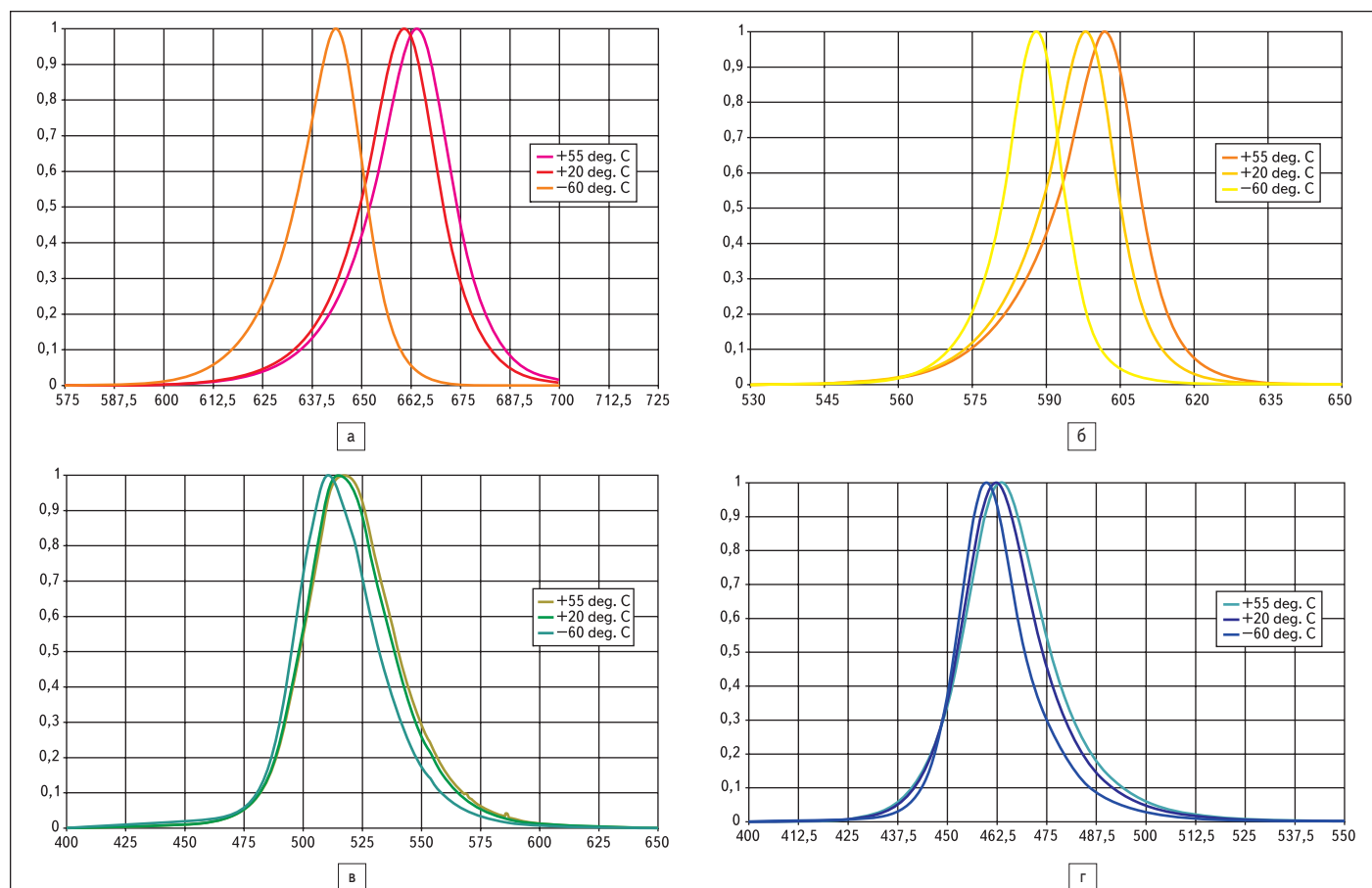


Рис. 17. Относительное спектральное распределение излучения светодиодов при различных температурах окружающей среды от -60 до +55 °C: а) красных б) желтых, в) зеленых, г) синих

Коэффициент K показывает, какая интегральная, «весовая» доля исследуемого спектра присутствует в излучении относительно всей «массы» — кривой видности $V(\lambda)$. Формула (4) для нахождения этого коэффициента хорошо известна и не нуждается в комментариях.

$$K = 683 \frac{\int_{780}^{360} E(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{780}^{360} E(\lambda) d\lambda} \quad (4)$$

Здесь $E(\lambda)$ — относительное спектральное распределение светодиода, а $V(\lambda)$ — относительная спектральная световая эффективность (кривая видности глаза).

Однако все же стоит отметить, что этот параметр включает в себя интегральную сумму всех отдельных описанных величин и поэтому служит хорошей характеристикой качественных показателей спектра. А значит, его поведение при изменении температуры, показанное на рис. 19 синей линией на всех графиках, вместе с изменением полуширины спектра позволит четко представлять картину уходов цветовых и мощностных (имеется в виду квантовый выход или оптическая мощность) характеристик светодиодов, особенно если связать

эти зависимости с люмен-амперными, показанными на рис. 11–14. Изменение параметров спектра от температуры, соотношенное с изменением светового потока даст функцию зависимости оптической мощности светодиода от прямого тока I_f при различных температурах — формула (5).

$$P(T_a) = F(T_a)/K(T_a) \quad (5)$$

На рис. 20–21 рассмотрены зависимости колориметрических параметров от температуры, которые наиболее часто указываются в спецификациях. Это имеющие малый физический смысл доминирующая длина волны L_{dom} и координаты цветности. Для более удобного чтения графиков приведена таблица 1, в которой собраны все обсуждающиеся здесь колориметрические характеристики.

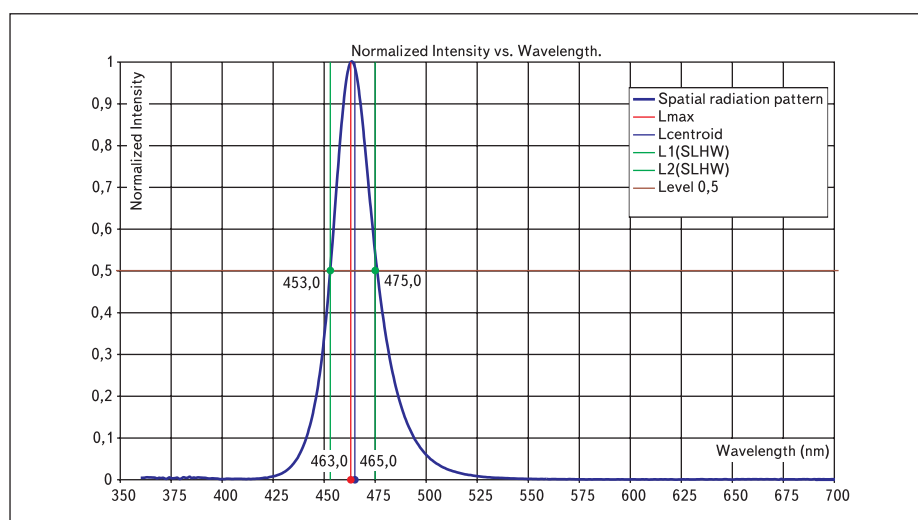


Рис. 18. Детализация спектра излучения синего светодиода. Показаны основные физические параметры, характеризующие спектр

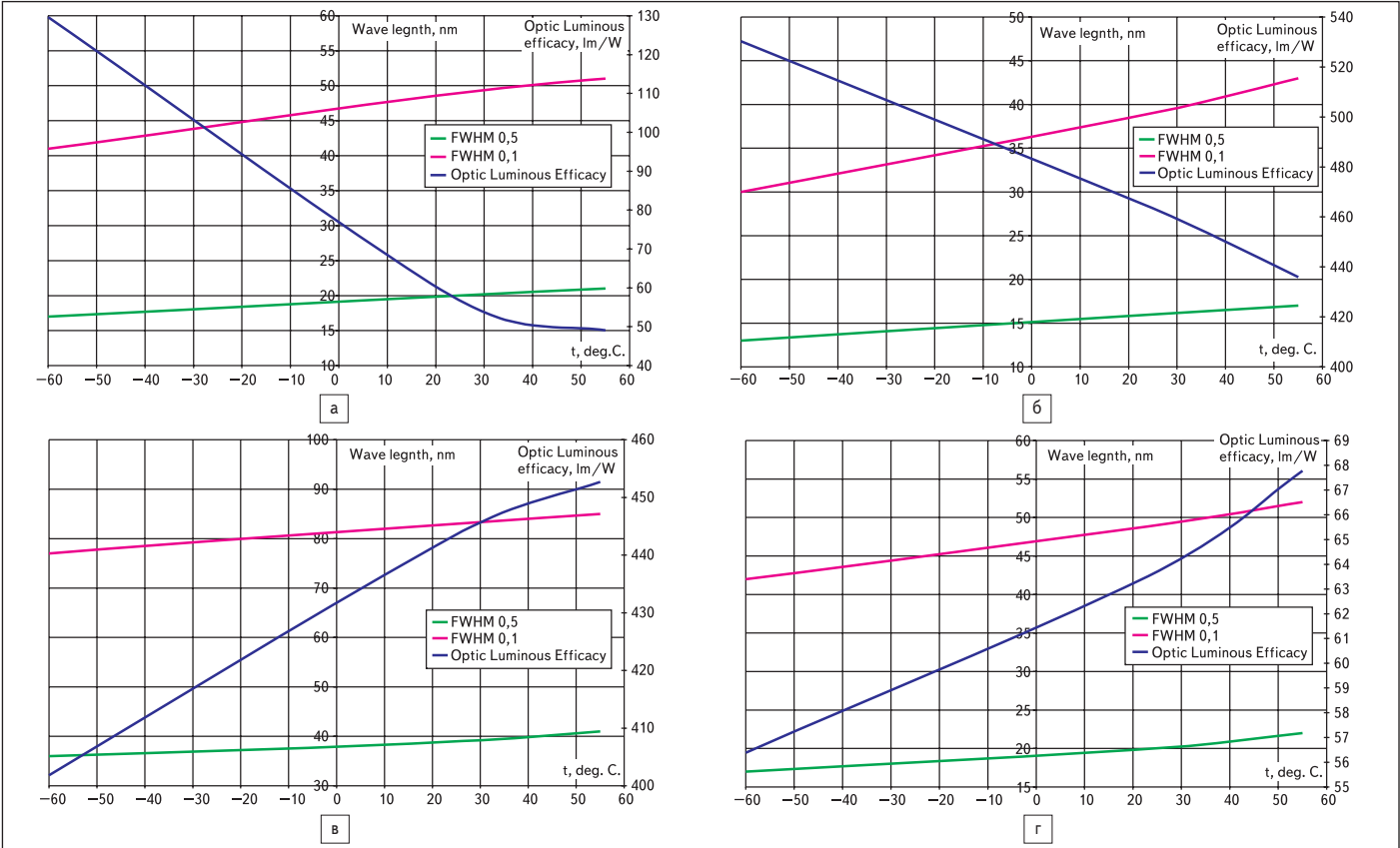


Рис. 19. Спектральная эффективность излучения и ширина спектра излучения по уровням 0,1 и 0,5 светодиодов при различных температурах окружающей среды от -60 до +55 °С: а) красных б) желтых, в) зеленых, г) синих

Происхождение этих величин также достаточно известно, и они, будучи полученными расчетным способом из спектра и функции $V(\lambda)$, пропорционально изменению характеристики спектрального излучения также будут изменяться с температурой. Другими словами, практически все исследования спектрального состава излучения, описанные выше, собственно и направлены на получение этих «нефизических» характеристик, регламентированных МКО в 1931 году для описания колориметрических свойств излучения. Но для пользователей светодиодов именно они явля-

ются наиболее важными для сравнения и применения. Для наглядности описания координат цветности на графики рис. 21 дополнительно нанесены зоны ограничения применения световых сигналов по цвету в соответствии со следующими нормативными документами:

- ГОСТ 25695-91 «Светофоры дорожные. Типы. Основные параметры»;
- ГОСТ 24179-80 «Светофильтры, светофильтры-линзы, линзы, рассеиватели и отклоняющие вставки стеклянные для сигнальных приборов железнодорожного транспорта»;

Официальные рекомендации Международной комиссии по освещению (МКО), публикация МКО № 2.2 (ТС-1.6). Цвета световых сигналов. 1975.

Очевидно, что такой подход к колориметрическим параметрам светодиодов для большинства устройств на их основе совершенно не требуется, но в данной статье мы рассматриваем практически все возможные, и в том числе определенные указанными стандартами, применения светодиодов на практике. Далее будет описана причина появления подобных стандартов и важность их соблюдения.

Влияние температурных зависимостей характеристик светодиодов на восприятие глазом человека результирующего излучения

Все параметры и характеристики светоизлучающих диодов, как зависящие от температуры, так и не зависящие, предназначены исключительно для того, чтобы быть замеченными именно глазом. Поэтому формирование излучения, ориентированного на глазной аппарат, должно быть всецело подчинено законам восприятия света глазом. Однако очень подробное рассмотрение физических и психологических процессов восприятия не является целью этой статьи, хотя и будет затронуто. Поэтому,

Параметры													Относительная спектральная световая эффективность, К
t, °C	X	Y	Z	Ldom, нм	Lmax, нм	Lcen, нм	L1, нм	L2, нм	FWHM 0,5, нм	L1, нм	L2, нм	FWHM 0,1, нм	
55	0,71056	0,2865	0,0045	636,03	664	663	653	674	21	635	686	51	49,086
25	0,7093	0,288	0,0027	633,5080107	661	660	650	670	20	633	682	49	56,676
-60	0,7	0,299	0,001	625,251058	643	641	634	651	17	618	659	41	129,634
Grad,N/°C				0,0937	0,1826	0,1913			0,0348			0,0870	0,7004
55	0,604	0,393	0,003	595,6011467	602	600	592	609	17	575	618	43	435,949
25	0,59	0,407	0,003	592,9375975	598	596	589	605	16	574	613	39	463,505
-60	0,548	0,451	0,001	585,539429	588	587	581	594	13	571	601	30	530,305
Grad,N/°C				0,0875	0,1217	0,1130			0,0348			0,1130	0,8205
55	0,162	0,688	0,15	522,2637086	517	520	499	540	41	482	567	85	452,686
25	0,154	0,686	0,16	520,5545243	515	519	499	538	39	482	565	83	443,603
-60	0,128	0,657	0,215	514,2227128	511	514	496	532	36	481	558	77	401,824
Grad,N/°C				0,0699	0,0522	0,0522			0,0435			0,0696	0,4423
55	0,132	0,061	0,807	469,0443951	463	465	453	475	22	442	494	52	67,777
25	0,133	0,056	0,811	468,1548041	462	464	453	473	20	442	491	49	63,7
-60	0,136	0,047	0,817	466,1106831	460	462	452	469	17	444	486	42	56,386
Grad,N/°C				0,0255	0,0261	0,0261			0,0435			0,0870	0,0991

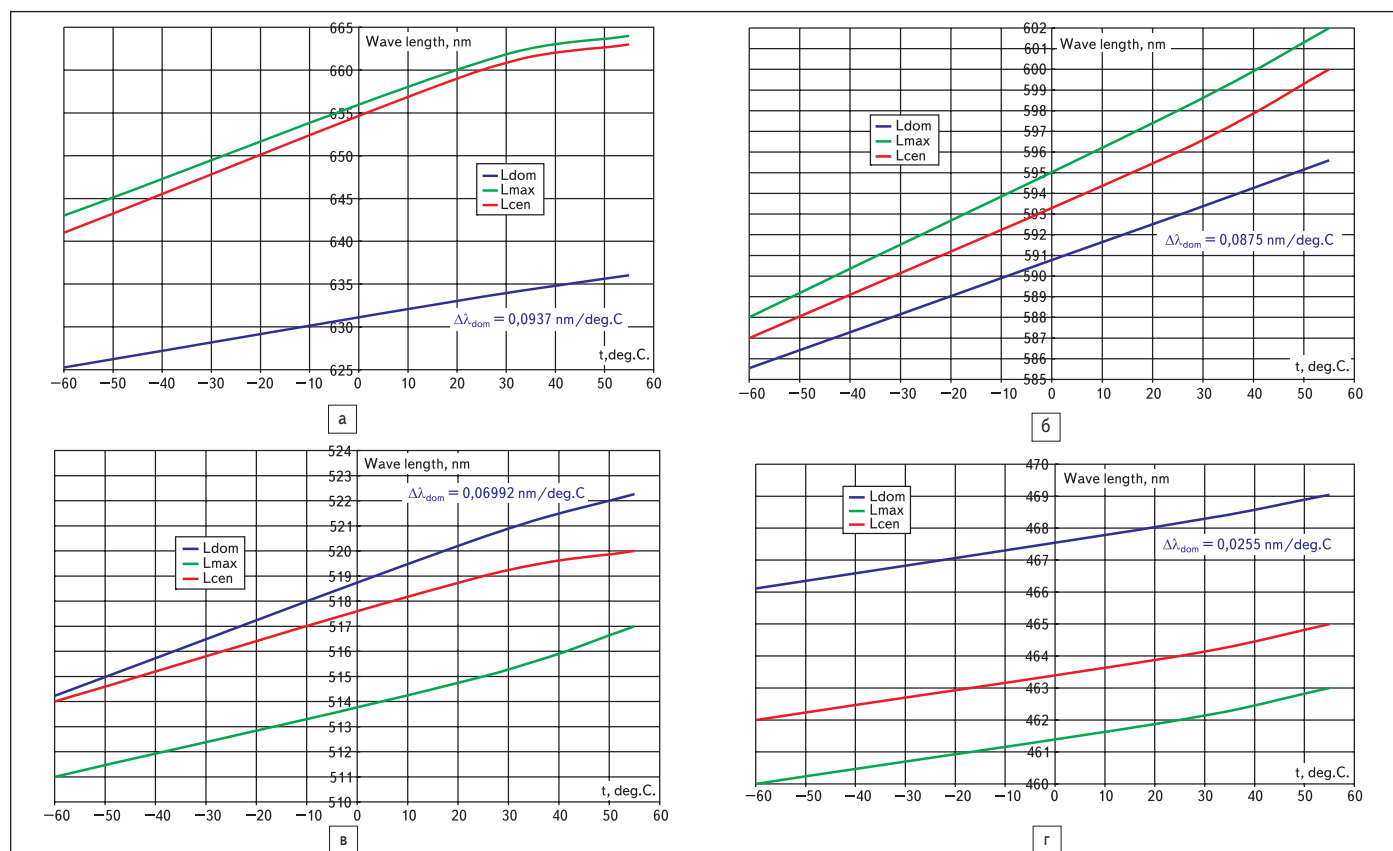


Рис. 20. Доминирующая L_{dom} , максимальная L_{max} и центральная L_{cen} длины волн излучения светодиодов при различных температурах окружающей среды от -60 до $+55$ °C: а) красных б) желтых, в) зеленых, г) синих. Цифрами на вставках указан усредненный градиент изменения L_{dom} в указанном диапазоне температур

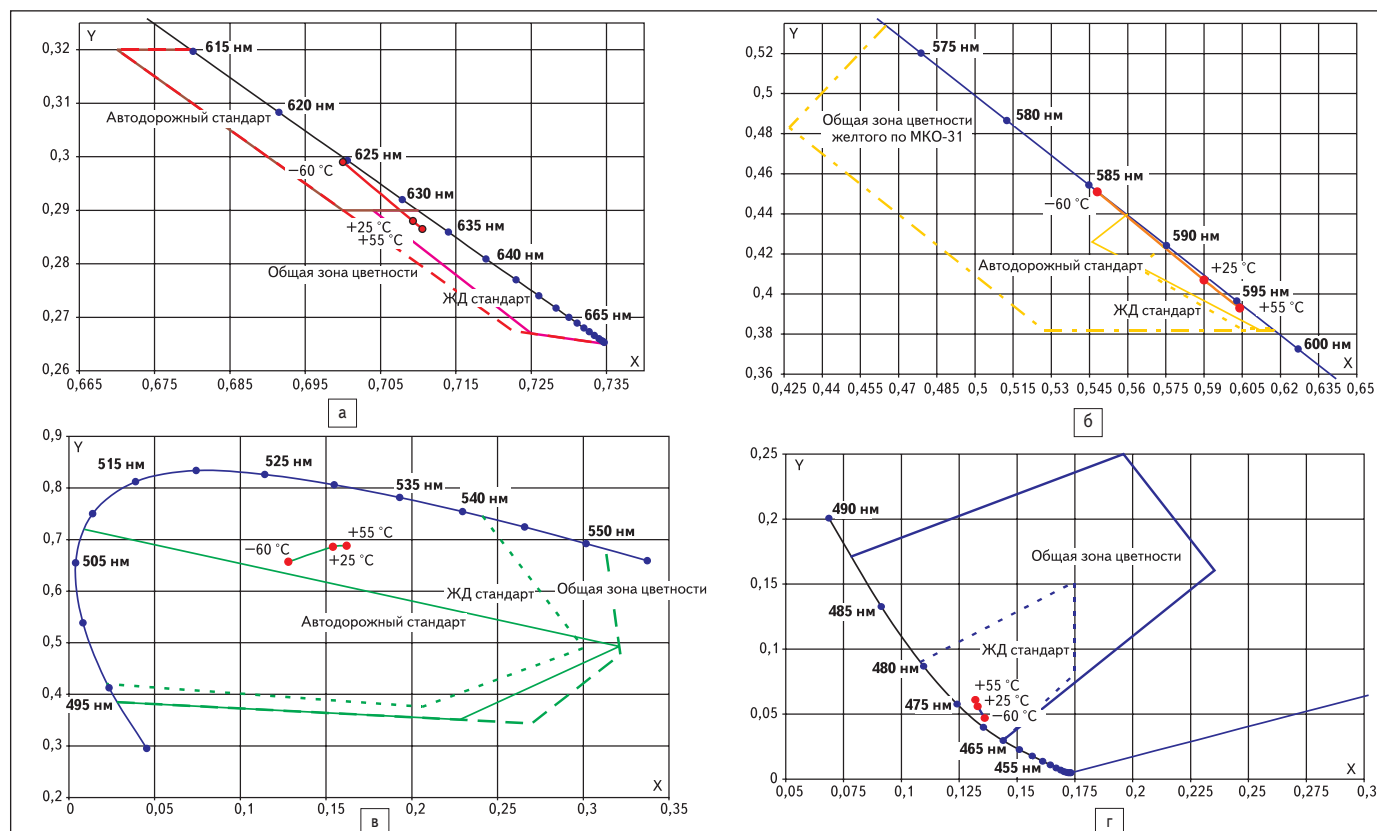


Рис. 21. Координаты цветности излучения светодиодов на Локусе МКО (1931) при температурах окружающей среды от -60 до $+55$ °C: а) красных, б) желтых, в) зеленых, г) синих. Показаны границы зон цветностей, регламентированных стандартами

возвращаясь к теме, стоит лишь обсудить, как описанные изменения характеристик светодиодов с температурой будут влиять на восприятие изображения, сформированного с помощью этих квазимонохроматических источников света, глазом человека.

Сначала следует отметить, что глаз человека является самым совершенным фотометрическим прибором в своем диапазоне длин волн. К его достоинствам надо отнести недостижимую долговечность с сохранением всех функций, и если потребуется, то и их самовосстановлением, большой динамический диапазон освещенностей, при которых сохраняются все параметры цветопередачи и разрешения изображения, автоматически управляемая оптика с широким диапазоном изменения фокусного расстояния и диафрагмы, высокое разрешение изображения (угол зрения 1°) наряду с углом бокового обзора практически в 180° , самый большой рабочий диапазон длин волн относительно других жителей планеты, высокая скорость передачи данных в центр по их обработке наряду с большим их объемом, непревзойденная интеграция всего прибора в малом объеме и ничтожное потребление энергии, и, наконец, что выгодно отличает его в свете тематики описываемого эксперимента от предмета нашего исследования — светодиода, независимость параметров от температуры окружающей среды ввиду постоянного высокоточного термостатирования в течение всей жизни владельца «устройства», которая вполне может превышать 100 лет.

Также следует всегда помнить о том, что глаз человека предназначен для использования в условиях естественных освещенностей Земли и, адаптируя искусственный источник для необходимого восприятия его глазом, надо учитывать особенности физики и характеристик этой освещенности. Фотобиологические процессы на Земле происходят в основном в диапазоне длин волн от 300 до 900 нм. Естественен вопрос о том, почему для зрения не доступны более короткие и длинные волны? Ответ содержится в величине их энергии. Эта энергия определяется по известной со школьной программы формуле:

$$E = hc/\lambda. \quad (6)$$

Здесь E — энергия кванта, h — постоянная Планка ($1,58 \times 10^{-34}$ кал с; 1 кал — 4,2 Дж), c — скорость света, 3×10^8 м/с, λ — длина волны светового излучения.

Для длин волн короче 300 нм удельная энергия превышает 95 ккал/моль. При такой энергии возникают повреждения молекул белков и нуклеиновых кислот. У волн длиннее 1800 нм, напротив, энергии оказывается недостаточно, чтобы вызвать в светочувствительном пигменте (родопсине) фотохимический процесс. Поэтому допустимая энергия светового восприятия большинства живых существ лежит в пределах от 15 до 65 ккал/моль, что соответствует диапазону длин волн

от 440 до 1900 нм. Зрение человека реализуемо в более коротком диапазоне от 380 до 750 нм. Лучи, длина волны которых выходит за указанные пределы, для нас невидимы.

Подобные факты легли в основу формирования системы восприятия цвета и определения пороговых освещенностей глаза, которые необходимы для достоверной оценки цвета раздражителя в виде сигнала светофора, например, или изображения видеозащита при различных условиях внешней освещенности. Международная комиссия по освещению (МКО) в официальных рекомендациях 1975 года для каждого цвета сигнала предлагает по две области. Одна область определяется достаточно широкими границами цветностей, а другая является более строгой. Область с широкими границами цветностей выбрана в соответствии с числом используемых в сигнальных системах различных цветов и возможным влиянием внешних источников света. Более строгие границы областей сигналов определяют более узкие области цветности, которые обеспечивают высокую вероятность распознавания цвета сигнала в заданной сигнальной системе как для наблюдателя с нормальным зрением, так и для наблюдателя с дефектами цветового восприятия. Данные рекомендации относятся к световым сигналам, используемым на всех видах транспорта — автомобильном, железнодорожном, морском, воздушном.

Значительное сужение областей цветности стандартами диктует особые требования к источникам излучения, формирующим сигналы. Совершенно очевидно, что это относится и не только к ответственным устройствам: физика восприятия одинакова, поэтому, безусловно, все сказанное будет верно для любого источника света. Как видно из графиков на рис. 21, не все устройства на светодиодах могут реализовать обозначенные требования именно из-за ухода цветовых параметров при изменении температуры. Это является значительной преградой к использованию светодиодов, однако опыты с изучением восприятия сигналов на светодиодах, параметры которых выходят за пределы стандартов, показали, что к квазимонохроматическому излучению светоизлучающих диодов следует подходить особым, лишь отчасти опираясь на стандарты, которые были разработаны для восприятия цветных сигналов от лампы со светочувствительными. Прежде всего, это объясняется узкополосностью излучения светодиодов по сравнению со светочувствительным и лампой (ширина полосы меньше приблизительно в 4–5 раз). Это обстоятельство может сильно изменить границы областей цветности достоверного восприятия [4].

Доказано, что при условии одинаковой освещенности глаза сигналом на лампе с фильтром и светодиодах дальность видимости и вероятность распознавания сигнала на светодиодах значительно повышаются еще и из-за равномерного заполнения апертуры сигнала светофора светодиодами, что сильно увеличивает излучающую площадь, тогда как

в прежнем варианте можно увидеть лишь проекцию нити накала лампы [4]. Оказалось, что несмотря на большое расстояние наблюдения (1000 м), когда оба исследуемых сигнала являются точечными, этот факт сильно повлиял на восприятие. То же самое было замечено и при исследованиях дальности обнаружения световых сигналов морской навигации на расстоянии до 12 морских миль. Светодиодный фонарь плавучего буя был отчетливо виден, и можно было достаточно точно определить его цвет даже с такого расстояния, несмотря на то, что из-за очень малого уровня освещенности сетчатки, глаз переходит в область малых сигналов, где доминирует палочковое зрение, не позволяющее достоверно различать цвета. Важность открытия этого факта достаточно велика: в конечном итоге правильность определения цвета сигнала светофора определяет безопасность движения и жизни человека.

Однако температурные уходы цветовых параметров светодиодов пока остаются значительными и обязательно требуют внимания и коррекции. Изменение спектрального состава излучения, показанное на рис. 17, приводит к включению для восприятия различных видов фоторецепторов (палочек и колбочек), которые существенно отличаются чувствительностью и поэтому требуют различных интенсивностей для одинаково верного восприятия различающихся по спектру и, соответственно, по цвету излучений. Именно с этим связано и большое количество несоответствий в цветовом восприятии изображений, формируемых светодиодными источниками, которые могут изменять свои характеристики с температурой. Здесь уместно говорить как о нарушении баланса белого цвета, так и об изменении цветов отдельных полей.

Но цвет — это еще не все, что составляет проблему в работе светодиода с его температурными уходами параметров. Возможности глаза ограничены не только спектральным диапазоном электромагнитных волн, но и определенным диапазоном интенсивностей света. Сетчатка глаза состоит из четырех видов рецепторов (три вида колбочек и один вид палочек) с разной чувствительностью как к интенсивности света, так и к его спектральным характеристикам. «Матрица» глаза содержит 6,5 миллионов колбочек и 110–120 миллионов палочек. Самые лучшие современные неживые аналоги отличаются разрешением на порядок величины меньшим, чем сетчатка. Световым потоком управляет диафрагма зрачка, не позволяя рецепторам выходить за пределы динамического диапазона.

Рис. 11–16 (см. «КиТ» № 9'2005, 52–53) иллюстрируют именно этот эффект, когда, попадая в одинаковые температурные условия, светодиоды разных цветов по-разному изменяют свои характеристики интенсивности излучения. Наряду с изменением цвета будет наблюдаться еще и изменение яркости, что также искажает первоначальную картину. Разные градиенты такого изменения, как вид-

но из графиков, приведут к появлению неравномерности на поле полноцветного изображения, сформированного светодиодами в виде нарушения цветопередачи уже не только изменением спектрального состава исходных цветов, но и изменением их интенсивности, которая также входит в известную формулу для белого цвета:

$$F = rR + gG + bB. \quad (7)$$

Соответственно, в устройствах, где функция яркости источника является основной, например, в том же светофоре, с изменением температуры может измениться как определенная стандартом разница в осевых силах света между сигналами других цветов, так и интенсивность отдельных сигналов (на некоторых температурах — до неприемлемых значений, см. табл. 2).

Оба этих обстоятельства недопустимы и приведут также к нарушению вероятности правильного восприятия.

Также по-иному будут выглядеть и устройства, использующие управление интенсивностью свечения светодиодов, где применяется не статическая характеристика (включено–выключено), а управляемая широтно-импульсным образом с модуляцией тока или только аналоговым образом. Здесь применима люмен-амперная характеристика при различных температурах, показанная на рис. 11–14 (см. «КиТ» № 9'2005, с. 52). Однако следует обратить внимание на то, что динамическая характеристика чувствительности глаза имеет несколько другой вид, и, скорее, приближается к экспоненциальной, при этом не завися от температуры, как мы выяснили ранее. В то же время светодиодная характеристика излучения не только представляет собой практически прямую линию, но еще и увеличивает крутизну с уменьшением температуры. Этим проблем не имеет источник света на лампе — ее параметры мало зависят от температуры (рис. 22). Поэтому меняющееся по интенсивности излучение светодиодов, функцией изменения которого является модуляционная характеристика питания, будет восприниматься с существенным отличием от традиционных источников на лампах.

Этот момент обязательно отразится на визуальном восприятии устройств на светодиодах при разных температурах или при простой замене ламп светодиодными источниками света.

Таблица 2. Нормированная при +20 °С осевая сила света автодорожных светофоров и ее изменение с температурой в случае исполнения на светодиодах. Нижняя графа поясняет изменение соотношений осевых сил света красного и зеленого сигналов на разных температурах

Цвет	Сила света I_v , кд		
	50 °С	20 °С	–50 °С
Красный R	170	200	290
Желтый Y	255	300	435
Зеленый G	170	200	240
$I_v(G)/I_v(R)$	0,67	0,67	0,55

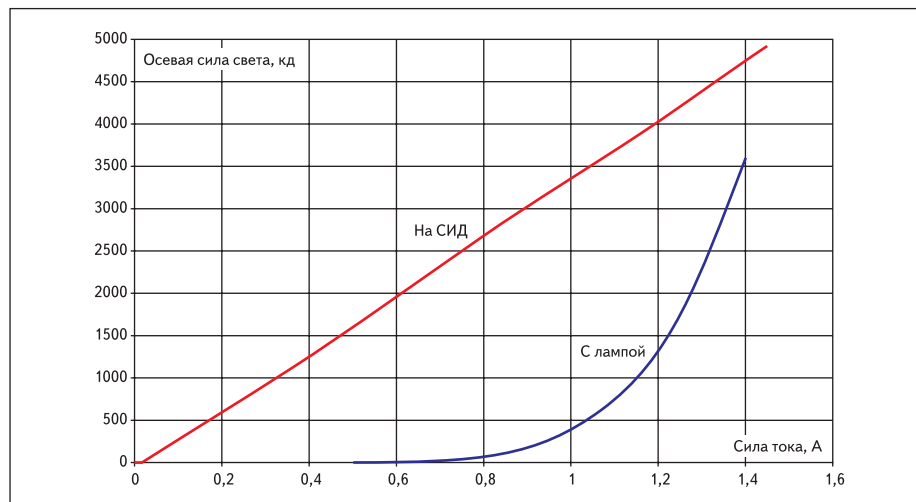


Рис. 22. Люмен-амперные характеристики светоблоков, применяемых в железнодорожных светофорах, на основе различных источников излучения. Такую же зависимость будут иметь любые управляемые светильники

Некоторые вопросы методов компенсации ухода параметров

Изучение всего комплекса температурных зависимостей параметров светодиодов не может не натолкнуть на поиск способов компенсации уходов этих параметров. Существует два основных пути построения системы учета и смягчения последствий температурных изменений. Первый — непосредственно влияющий на физические условия работы светодиодов. Это может быть некая термостабилизация окружающей среды, применение различных комбинаций вентиляции, радиаторов конвекционного охлаждения и, наоборот, подогрев при отрицательных температурах. Однако точно реализовать поддержание температуры в соответствии с приведенными зависимостями светодиодов этими средствами довольно затруднительно, хотя, если не требуется выполнения слишком жестких условий, то наиболее доступно и легко реализуемо. Второй способ касается в основном программно управляемых источников, таких как табло, бегущие строки, полноцветные экраны на светодиодах, где очень заметно любое, даже самое незначительное изменение характеристики светового излучения. Здесь температурные уходы очень эффективно отслеживаются с применением математического аппарата управляющего программного обеспечения, когда в зависимости от температуры в зоне работы светодиодов, регистрируемой термодатчиком, например, изменяется модуляционная характеристика светодиода. Так, при понижении температуры с целью сохранения заданной яркости табло на прежнем уровне возможно уменьшение времени зажженного состояния светодиода (при управлении широтно-импульсным способом) пропорционально зависимостям, показанным на рис. 16 (см. «КиТ» № 9'2005, с. 53).

Введя в программу обработки данных формирования изображения указанные характеристики по разным цветам, можно добиться стабильной яркости полотна табло при боль-

шом разбросе температур окружающей среды. Дальнейшим совершенствованием такого аппарата коррекции может быть и учет цветовых характеристик. Для этого потребуются вводить в программу еще и алгоритм вычисления необходимых соотношений для интенсивностей свечения основных цветов при изменении температуры по формуле (7), сохраняя баланс белого независимо от температурного изменения их спектрального состава, показанного на рис. 17 и в таблице 1. Также, если позволяет система управления, можно воспользоваться не только функцией изменения времени включенного состояния, но и изменить значение тока I_f в импульсе. Возможно, именно в таком варианте найдется оптимальный режим компенсации уходов параметров в широком диапазоне температур окружающей среды.

Автор выражает особую благодарность за организацию и поддержку экспериментов:

- Владимиру Семеновичу Абрамову, к. т. н.;
- Петру Павловичу Аникину, к. ф-м. н.;
- Валерию Петровичу Сушкову, д. т. н.

Литература

1. Мосс Т. Полупроводниковая оптоэлектроника. М.: Мир. 1976.
2. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Том 1–2. М.: Мир. 1984.
3. Абрамов В. С., Никифоров С. Г., Соболев П. А., Сушков В. П. Свойства зеленых и синих InGaN-светодиодов // Светодиоды и лазеры. 2002. № 1–2.
4. Агафонов Д. Р., Мурашова М. А., Никифоров С. Г., Пинчук О. П., Столяревская Р. И. Исследования визуального восприятия красных железнодорожных светофоров на основе СИД // Светотехника. 2003. № 6.
5. Иваницкий Г. Вернисаж инфракрасных портретов // Наука и жизнь. 2005. № 8.
6. Официальные рекомендации Международной комиссии по освещению (МКО), публикация МКО № 2.2 (ТС-1.6). Цвета световых сигналов. 1975.